

УДК 622.271.1(001)

Г.П. Необутов

ВЛИЯНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА ПРОЧНОСТЬ ЛЬДОПОРОДНОГО МАТЕРИАЛА

Представлены результаты экспериментальных исследований степени влияния масштабного фактора на механические свойства искусственно замороженных закладочных смесей. Показано, что его прочность в условиях одноосного сжатия уменьшается по мере увеличения размеров образцов.

Ключевые слова: льдопородный материал, прочность на одноосное сжатие, масштабный эффект, статистическая теория прочности.

Под масштабным эффектом понимается зависимость прочности образцов (изделий), подобных по геометрической форме, от их размеров. Несмотря на то, что влияние размеров образцов на их механические свойства имеет большое теоретическое и практическое значения, природа масштабного эффекта до сих пор не выяснена.

Неоднородность среды приводит к проявлению масштабного эффекта в отношении прочностных характеристик. В общем случае, графики масштабного эффекта прочностных свойств, отражающие уменьшение показателей этих свойств с увеличением масштаба измерений, аппроксимируются кусочно-гладкими кривыми, точки перегиба которых соответствуют границам блоков различных порядков. Из этого следует, что установленные опытным путем характеристики прочностных свойств справедливы лишь для масштаба измерений, для которого они определены. Если при переходе к более крупным объемам породы качество дефектов и других элементов неоднородности не изменилось, то можно ожидать, что показатели прочности не подвергнутся значительным изменениям. Если же переход к более крупным объемам породы сопровождается каче-

ственным изменением ее состава, строения и состояния, то изменятся и показатели прочности.

Прочностные свойства массивов горных пород определяются двумя группами факторов. К первой группе относятся: генезис, минеральный состав, структурные и текстурные особенности слагающих их пород или ассоциаций, характер и степень первичной трещиноватости, неоднородности и анизотропности. Вторая группа включает характеристики состояния пород в массиве: вторичную трещиноватость, выветрелость, измененность, обводненность, специфику проявления естественных напряжений, температурный режим, вторичную неоднородность и анизотропность. Наибольшие сложности возникают при учете влияния факторов второй группы, которым часто принадлежит определяющая роль в формировании прочностных свойств массивов.

Исследования проявлений масштабного фактора в горных породах, проводившиеся с целью решения вопросов горного давления, свидетельствуют о том, что прочность твердых тел в условиях одноосного сжатия (разрыва) в ряде случаев, по мере увеличения размеров образцов, уменьшается до определенного, ха-

ракторного для каждого материала минимума. В других случаях прочность пород с увеличением размеров образцов возрастает, достигая некоторого максимума. Как показали исследования, изменение прочности горных пород в лабораторных условиях вызывается не только внутренним несовершенством строения горных пород – трещиноватостью, пористостью, неоднородностью строения и состава, влажностью, но и масштабным эффектом. Действительно, при испытании небольших блоков горных пород существенное влияние на прочность оказывает изменение состояния поверхностного слоя образцов, вызванное влиянием механических, физико-химических и других факторов, а также условиями проведения экспериментов.

В представляемой статье приводятся результаты исследования влияния размеров образцов льдопородного материала при определении его прочностных характеристик для предсказания их поведения в производственных условиях.

Экспериментальные исследования основных физических характеристик льдопородной закладки проводились на образцах комплексным методом испытаний, разработанным на основе анализа опыта проведения аналогичных исследований с учетом основных теоретических положений механики мерзлых пород, моделирования и математической статистики. Физическое моделирование осуществлялось на основе известных положений теории подобия и методик моделирования, предусматривающих геометрическое подобие модели и природы, геометрическое подобие гранулометрических составов, равенство объемных весов и углов внутреннего трения материалов модели и природы. Линейные размеры образцов при испытаниях при-

нимались в масштабе 1 : 50, что соответствует типовым размерам «тумбовых» льдопородных целиков в реальных условиях ведения горных работ.

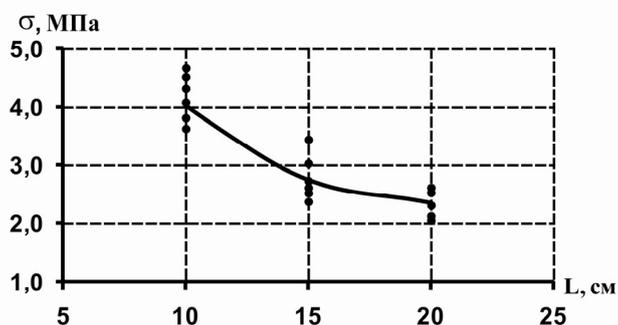
Для определения степени влияния масштабного эффекта на механические свойства искусственно замороженных закладочных смесей сравнивались пределы прочности на одноосное сжатие образцов льдопородного материала кубической формы по трем сериям испытаний, проведенных на образцах-близнецах с размерами ребер 100, 150 и 200 мм. Основной состав породного материала (алевролит месторождения Бадран) составляли фракции размером 5 – 10 мм.

Льдопородные образцы формировались послойным намораживанием смеси из дробленых пород и воды в морозильной камере следующим образом.

Для образования льдопородного слоя охлажденный до температуры -20°C породный материал засыпался в металлические разборные формы с внутренними размерами, соответствующими размерам образцов проводимой серии опытов. Количество слоев в испытываемых образцах любого размера было одинаковым и равнялось пяти. Каждый слой, высота которого для определенной серии испытаний составляла соответственно 20, 30 и 40 мм, равномерно наполнялся водой, охлажденной до температуры $+5^{\circ}\text{C}$, и подвергался заморозке до температуры -20°C . После промерзания предыдущего слоя операция повторялась до полного заполнения формы. Количество воды составляло 20 % от его объема.

Сформированный льдопородный материал, по всей видимости, можно рассматривать как крупнообломочный твердомерзлый слабоблудистый грунт (порода) с присущими ему свойствами.

Испытания льдопородных образцов на одноосное сжатие проводились на



Зависимость предела прочности льдопородного материала на одноосное сжатие σ от его размеров L .

прессе универсальной испытательной машины UTS-250 со стандартным блоком измерения и управления (компьютерное оснащение), укомплектованной холодильной установкой NOSKE-KAESER, при скорости нагружения образца 2 мм/мин до разрушения, после которого машина выдавала графо-цифровые результаты в МПа.

Наименьшее число образцов – 6, которое должно быть исследовано в одной серии опытов, выбиралось с учетом неоднородности состава горных пород, оцениваемых коэффициентом вариации, прочности при повторных испытаниях и желаемой точности значения средней прочности пород и основывалось на общеизвестных положениях математической статистики и рекомендациях по ее применению в горном деле.

Анализ результатов экспериментальных исследований влияния масштабного фактора на прочность льдопородного материала (см. рисунок) показал, что его прочность в условиях одноосного сжатия уменьшается по мере увеличения размеров образцов, причем прочность образца кубической формы с ребром в 100 мм в 1,8 раза выше прочности аналогичного образца с размером ребра в 200 мм.

Из приведенного графика видно, что предел прочности образцов льдо-

породного материала на одноосное сжатие при увеличении стороны их ребра с 100 до 200 мм уменьшается с 4,27 до 2,36 МПа, асимптотически приближаясь к 2 МПа.

Статистическая обработка результатов испытаний выявила, что коэффициент вариации показателей в каждой серии опытов возрастает с увеличением размеров образцов соответственно с 13,8 до 21,6 %, что указывает на большую достоверность результатов проведения испытаний с образцами со стороной ребра в 100 мм.

Физическую сущность установленного масштабного эффекта раскрывает статистическая теория прочности хрупких материалов, согласно которой прочность всего тела определяется прочностью самого слабого его места, связанного со случайной неоднородностью; вероятность встречи такой неоднородности в телах разных размеров не одинакова. Влияние объемного масштабного эффекта определяется внутренним несовершенством строения, трещиноватостью и другими структурными дефектами, а также неоднородностью вещественного состава, текстуры и структуры горных пород. Из приведенных экспериментов видно, что при малых объемах льдопородного материала и малых их поверхностях имеется меньшая вероятность встречи опасных структурных дефектов.

Статистическая теория прочности была выдвинута еще в 1933 г. А.П. Александровым и С.Н. Журковым. Они показали, что при малых объемах кварцевых и стеклянных нитей и малых их поверхностях имеется меньшая вероятность встречи опасных структурных дефектов. Выдвинутая ими

теория объяснила влияние размеров образцов на их прочность. В дальнейшем она получила математическое выражение в работах В. Вейбулла.

В развитии этой теории принимали участие другие исследователи, которые также считали, что прочность всего тела определяется прочностью самого слабого его участка – дефекта, статистически распределенного по всему объему образца. На этом основании они доказывали, что существует закономерное распределение экспериментально определенных значений прочности, среднее значение прочности зависит от объема рабочей части нагружаемого тела, поэтому прочность при изгибе должна быть больше, чем при растяжении.

Характер деформирования и разрушения определяется одновременным протеканием на микроуровне нескольких процессов, интенсивность которых зависит от уровня нагрузки, длительности и режима ее приложения. Установленную закономерность можно объяснить тем, что при мгновенном приложении нагрузки в наиболее слабых местах, приуроченных к стыкам элементов, дефектам структуры в виде полостей, трещин и т.п. возникает концентрация напряжений и разрыв хрупких связей, сопровождающийся необратимым смещением структурных элементов и нарушением сплошности.

Конечным результатом определения характера изменения прочностных характеристик льдопородного материала при увеличении их размеров является выбор оптимальных размеров образцов испытуемого льдопородного материала при минимальной вариации опытов, которые бы наиболее полно характеризовали прочность льдопородных целиков в производственных условиях.

Как известно, прочностные свойства горных пород желательнее опре-

делять на образцах возможно большего размера. Если по какой-либо причине этого сделать нельзя, то минимальный образец должен выбираться таким, чтобы он обладал всеми свойствами породы, которую он представляет. Такой элементарный объем должен быть достаточным, чтобы наличие в нем всех характерных для данной породы структурных и текстурных элементов, а также их соотношения соответствовали наличию и соотношению их в достаточно больших объемах[1]. Поэтому рекомендуется принимать такой диаметр D элементарной площадки, на котором должно уложиться не менее 30 зерен, причем 50 % площади, занятой зернами, должна составлять площадь, занятая цементом. Исходя из этого, диаметр элементарной площадки D должен быть $D = 6,7 d$, где d – средний диаметр зерен. Тогда, начиная с крупнозернистого песчаника, D будет меньше одного сантиметра. Если принять $D = 2$ см, то это будет удовлетворять указанным условиям для всех пород.

Рассматривая льдопородный материал по аналогии с такой же сцементированной обломочной горной породой, как конгломерат, диаметр элементарной площадки которого при среднем диаметре зерна, равном 1 см, составляет 6,7 см [1], получим, что линейный размер элементарной площадки для льдопороды с таким же средним диаметром фракций также должен быть равным 6,7 см. Изложенное показывает, что образец льдопородного материала кубической формы размером ребра в 100 мм вполне удовлетворяет вышеуказанным условиям.

Таким образом, на основании результатов изучения масштабного эффекта при исследовании закономерностей изменения прочностных характеристик образцов льдопородной

Результаты испытаний на сопротивление сжатию кубиков различного размера супесчаного гравия и гальки при температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ для моментов времени действия нагрузки 2 мин и 200 ч.

Время, $t_{\text{пр}}$	$\sigma_{\text{пр.}}$ (МПа), длина ребра кубика, мм							
	100		150		200		250	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
2 мин	3,00	3,06	2,95	3,16	3,12	3,27	–	3,30
200 ч	1,49	1,48	1,67	1,67	1,70	1,69	1,71	1,70

закладки в зависимости от количества намораживаемых слоев, крупности фракций твердого заполнителя и термовлажностных условий его формирования с учетом минимальных вариации опытов, масштаба моделирования и диаметра элементарной площадки установлены оптимальные размеры испытываемых образцов равными длине ребра кубика в 100 мм, которые соответствуют геометрическому масштабу моделирования 1 : 50.

Из опубликованных работ, посвященных вопросу определения минимального объема искусственно замороженного образца, обладающего всеми физико-механическими свойствами массива породы, которую он представляет, следует отметить исследование В.Н.Тайбашева [2].

Серия опытов на одноосное сжатие была проведена на искусственно замороженных при температуре $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ смесях (супесчаный гравий с галькой) кубической формы с ребром длиной 100, 150, 200 и 250 мм, находящихся в состоянии полного влагонасыщения. Максимальный размер крупнообломочной фракции в испытанном грунте составлял 40 мм.

Серию образцов (7 – 10) одинакового размера испытывали при различных, но постоянных для каждого опыта нагрузках. При этом время перехода из стадии установившейся ползучести в стадию прогрессирующего течения ($t_{\text{пр}}$) изменялось от 2 мин до 215 ч.

Проведенные исследования позволили автору сделать вывод о том, что

при длительных испытаниях прочность кубика супесчаного гравия с галькой размерами $200\times 200\times 200$ мм практически соответствует прочности образца неограниченно большого размера. Поэтому для лабораторных опытов был принят размер образца сечением 200×200 мм.

Из приведенных в работе [2] графика и табличных данных видно, что по мере увеличения размеров образцов происходит некоторое увеличение их прочности на одноосное сжатие.

Характеризуя результаты исследований [2] можно отметить, что наблюдаемая обратная данным наших испытаний картина – увеличение прочности по мере увеличения размеров образцов, при достоверности всех экспериментальных данных объясняется, по всей видимости, различием и особенностями внутреннего строения, текстуры и структуры образцов и т.д., обусловленных условиями их формирования (температура, влажность, формируемая конструкция).

Из литературных источников известно, что ни одна из ранее описанных теорий по вопросу о природе масштабного эффекта, проявляющегося при испытании различных материалов, не может объяснить противоречивых данных, получаемых на горных породах. Поэтому М.И. Койфман [3] на основе анализа своих опытов и исследований других ученых выдвинул гипотезу о существовании не одного, а двух масштабных эффектов: объемного и поверхностного. Под влиянием главно-

го, или объемного, масштабного эффекта, зависящего от наличия дефектов в объеме образца, прочность пород с увеличением объема образцов уменьшается. Под влиянием дополнительного поверхностного масштабного эффекта прочность пород при увеличении размеров образцов возрастает. Оба масштабных эффекта действуют одновременно.

Поверхностный масштабный эффект зависит от нарушения поверхностного слоя образцов при их изготовлении и обработке. Такие процессы, как выбуривание, резание, шлифование, а также действие влаги повреждают поверхностный слой образцов. По мере уменьшения размера образцов нарушенная поверхность, приходящаяся на единицу объема, возрастает и, следовательно, повреждение поверхностного слоя на одну и ту же глубину для малых образцов будет большим, чем для крупных. Поэтому поверхностный масштабный эффект приводит к понижению прочности образцов с уменьшением их размеров.

Если прочность поверхностного слоя образцов не уменьшается, а увеличивается, например, вследствие образования твердой корки на цементных образцах при схватывании, то такой поверхностный масштабный эффект

приводит к повышению прочности при уменьшении размера образцов и действует аналогично объемному масштабному эффекту.

Теория двух масштабных эффектов позволяет объяснить возможность получения (при испытании геометрически подобных образцов) как увеличения, так и уменьшения прочности и устранить указанные выше противоречия между опытными данными и выводами различных исследователей [3].

В заключение отметим следующие основные результаты исследования влияния масштабного фактора на прочность льдопородного материала:

– впервые установлена зависимость предела прочности на одноосное сжатие образцов льдопородного материала, сформированных послойным намораживанием пород, от их размеров, позволяющая оценить уровень прочности льдопородных целиков при управлении состоянием массива горных пород закладкой выработанного пространства;

– выявленная зависимость имеет важное прикладное значение при оптимизации безопасных конструктивных параметров рациональной геотехнологии разработки рудных месторождений области криолитозоны с использованием льдопородной закладки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руппенейт К.В. Введение в механику горных пород / К.В. Руппенейт, Ю.М. Либман. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 356 с.

2. Тайбашев В.Н. Физико-механические свойства мерзлых крупнообломочных пород / В.Н. Тайбашев. – Магадан: ВНИИ-1, 1973. – 156 с.

3. Койфман М.И. О влиянии размеров на прочность горных пород / М.И. Койфман // Исследование физико-механических свойств горных пород применительно к задачам управления горным давлением. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 33–43. **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Необутов Геннадий Павлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Учреждение Российской академии наук Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского Сибирского отделения РАН, igds@sci.yakutia.ru